

**BATTERY STATE OF CHARGE INDICATOR****Publication number:** DE3882374T**Publication date:** 1993-10-28**Inventor:** STEFFENS WILLI (DE)**Applicant:** FORD WERKE AG (DE)**Classification:****- International:** **G01R31/36**; G01R31/00; **G01R31/36**; G01R31/00;  
(IPC1-7): G01R31/36**- european:** G01R31/36M1J**Application number:** DE19883882374T 19880801**Priority number(s):** GB19870018280 19870801**Also published as:**

WO8901169 (A1)

EP0376967 (A1)

EP0376967 (A0)

EP0376967 (B1)

[Report a data error here](#)

Abstract not available for DE3882374T

Abstract of corresponding document: **WO8901169**

A battery state of charge indicator for a vehicle starter battery which includes a) means for periodically measuring the output voltage (u), the current (i) being withdrawn from or supplied to the battery, and the temperature (T) of the battery, b) battery current integrating means for integrating the battery current (i) with respect to time to produce an indication of the net charge (q) taken from the battery, c) means responsive to successive measured values of battery voltage (u), current (i) and temperature (T) and to the net charge (q) taken from the battery to predict the net charge (qe) which can still be withdrawn from the battery, is characterised by: d) means for generating an indication of the gassing current (ig) flowing inside the battery from the battery current (i), and e) means for adding the gassing current (ig) to the battery current (i) prior to integration thereof to correct for the effect of gassing current in the indication of withdrawn charge (q) taken from the battery and hence in the withdrawable charge (qe) which can still be withdrawn from the battery.

---

Data supplied from the **esp@cenet** database - Worldwide



①⑨ **BUNDESREPUBLIK**  
**DEUTSCHLAND**



**DEUTSCHES**  
**PATENTAMT**

①② **Übersetzung der**  
**europäischen Patentschrift**

⑤① Int. Cl.<sup>5</sup>:  
**G 01 R 31/36**

⑧⑦ **EP 0 376 967 B1**

⑩ **DE 38 82 374 T 2**

**DE 38 82 374 T 2**

②① Deutsches Aktenzeichen:	38 82 374.8
⑧⑥ PCT-Aktenzeichen:	PCT/GB88/00637
⑧⑥ Europäisches Aktenzeichen:	88 906 984.5
⑧⑦ PCT-Veröffentlichungs-Nr.:	WO 89/01169
⑧⑥ PCT-Anmeldetag:	1. 8. 88
⑧⑦ Veröffentlichungstag der PCT-Anmeldung:	9. 2. 89
⑧⑦ Erstveröffentlichung durch das EPA:	11. 7. 90
⑧⑦ Veröffentlichungstag der Patenterteilung beim EPA:	14. 7. 93
④⑦ Veröffentlichungstag im Patentblatt:	28. 10. 93

③⑩ Unionspriorität: ③② ③③ ③①

01.08.87 GB 8718280

⑦③ Patentinhaber:

Ford-Werke AG, 50735 Köln, DE

⑦④ Vertreter:

Ritzkowsky, H., Dipl.-Ing., 50769 Köln

⑧④ Benannte Vertragsstaaten:

BE, DE, FR, GB, IT, NL, SE

⑦② Erfinder:

STEFFENS, Willi, W-5100 Aachen, DE

⑤④ **BATTERIELADEZUSTANDSANZEIGE.**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patentamt inhaltlich nicht geprüft.

**DE 38 82 374 T 2**

### Batterie-Ladezustands-Anzeiger

Die vorliegende Erfindung befaßt sich mit der Bestimmung des Ladezustandes einer Fahrzeug-Starterbatterie.

Ladezustandsanzeiger werden für den Schutz und die Überwachung von elektrochemischen Akkumulatorbatterien und deren Lastzustand eingesetzt. Ihre Funktion besteht darin, den momentanen Ladezustand (lz) der Batterie zu bestimmen und einen Hinweis auf die in der Batterie verbleibende entziehbare Ladung (q.) zu geben.

Ladezustandsanzeiger werden bei Batterien für elektrische Straßenfahrzeuge, Industriefahrzeuge, Behindertenfahrzeuge, private und kommerzielle Fahrzeuge und in Freizeit- und Hobby-Beschäftigungen verwendet.

Bisher waren für diese Einsatzfälle vorgesehene Ladezustandsanzeiger im allgemeinen ungeeignet für Starterbatterien in Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren, da sie die Betriebsbe-

dingungen nicht angemessen berücksichtigen, denen Starterbatterien unterworfen sind.

5        Einer der Gründe hierfür ist die Tatsache, daß eine Starterbatterie normalerweise nicht im zyklischen Betrieb eingesetzt wird (d.h. daß sie keinem regelmäßigen Zyklus einer Ladung unterliegt, auf welche eine Entladung folgt, auf welche eine Aufladung folgt, usw.) und die meiste Zeit ihrer Lebensdauer im wesentlichen voll geladen bleibt. Der Zubehörhandel bietet nur z.T. mit einer Dämpfung zur Bildung eines Mittelwertes versehene Voltmeter an, die oft nur eine ungenaue Anzeige des Ladezustands von Starterbatterien zulassen.

10        Bei in zyklischem Betrieb eingesetzten Batterien berücksichtigt ein zuverlässiger Ladungszustandsanzeiger die entzogene und die zugeführte Ladung. Dieses Verfahren ist nur begrenzt anwendbar auf Starterbatterien, da die entzogene Ladung normalerweise gering ist, die Stromflußdynamik erheblich ist und der Fehler in der Ladungsmessung aufgrund vieler Betriebsjahre ständig zunimmt, sofern keine Vorkehrungen zu seiner Rücknahme getroffen sind. Der Anlaßstrom beträgt über 200 A, während der normale Entladestrom unter 30 A liegt. Es ist hier notwendig, andere Kriterien wie Temperatur, Entladungs-Stromstärke und lastfreie Spannung mit in Betracht zu ziehen, um über einen Zeitraum von mehreren Jahren eine nicht abwegige Angabe des Ladezustandes zu erhalten.

25        Durch die Komplexität der Bestimmung des Zustandes der Batterie und die relativ hohen Kosten des für den Umgang mit solch komplexen Bestimmungen erforderlichen Materials war der Einsatz von Ladezustandsanzeigern in Kraftfahrzeugen noch bis vor wenigen Jahren undenkbar - zumal Batterien, wenn sie ordnungsgemäß gepflegt werden, normalerweise über einen Zeitraum von mehreren Jahren zuverlässig arbeiten.

30        In den letzten Jahren jedoch sind die Anforderungen an den Wirkungsgrad und die Zuverlässigkeit von Starterbatterien gewachsen, aufgrund des zunehmenden Einsatzes von Elektronik und elektrischen Hilfsaggregaten wie z.B. Antiblockier-

35

systemen, elektronischer Einspritzung, Bordcomputern, elektrischen Fensterhebern, Sitzverstellvorrichtungen usw. Da einige dieser Lasten die Fahrsicherheit des Fahrzeuges betreffen, ist es entscheidend, einen zu niedrigen Ladezustand der Batterie zu vermeiden. Ein weiterer Aspekt entsteht aus der Lichtmaschinen-Verlustleistung während des Aufladevorganges, die auch dann auftreten, wenn die Batterie voll geladen ist. Leistungsverluste von über 1 kW könnten vermieden werden, wenn die Lichtmaschine dann von dem Motor abgekuppelt würde, wenn sich die Batterie in voll geladenem Zustand befindet. Diese Abkoppelung könnte von dem Ladezustandsanzeiger bewirkt werden. Auch ist der bei stehendem Fahrzeug für den Betrieb der Borduhr, des Bordcomputers usw. ständig erforderliche Strom in manchen Fällen auf 100 mA gestiegen. Dementsprechend ist eine Überwachung des Batteriezustandes dort notwendig, wo relativ lange Standzeiten vorkommen.

Mit den fallenden Preisen für Digital Schaltkreise und dem verstärkten Einsatz von Computern in Kraftfahrzeugen erscheint der Einsatz von Batterie-Ladezustandsanzeigern heute - aus den obengenannten Gründen - durchaus denkbar und machbar.

Ein Beispiel eines für zyklischen Betrieb geeigneten Ladezustandsanzeigers beschreibt US-A-4,390,841. Ein mathematisches Batteriemodell bildet die Grundlage einer Kapazitätsvorhersage ausgehend von Messungen des Entladestroms und von gespeicherten Batterieparametern. Eine Selbsteichung zur Berücksichtigung sich ändernder Batterie-Charakteristiken infolge von Alterung und Lade-/Entladegeschichte erfolgt durch den Vergleich einer voraussichtlichen Batteriespannung mit der tatsächlichen Batteriespannung, und durch die entsprechende Korrektur des mathematischen Modells.

Die vorliegende Erfindung verwendet ein verbessertes mathematisches Modell, welches den Gasungsstrom ( $i_g$ ) in der Batterie mit berücksichtigt. Dies ist bei Anlasserbatterien besonders wichtig, da sich ein wesentlicher Anteil der gespeicherten Ladung in Form eines Gasungsstromes  $i_g$  zusätzlich zu

dem äußeren, der Batterie entzogenen Strom  $i$  entladen kann.

Der vorliegenden Erfindung gemäß wird ein Batterie-Ladezustands-Anzeiger für eine Kraftfahrzeug-Starterbatterie geschaffen, mit:

5 a) Mitteln zur periodischen Messung der Ausgangsspannung ( $u$ ), des der Batterie entzogenen oder zugeführten Stromes ( $i$ ), und der Temperatur ( $\theta$ ) der Batterie;

b) Mitteln zur Batteriestrom-Integration, zur Integration des Batteriestromes ( $i$ ) in bezug auf die Zeit, zwecks  
10 Erstellung einer Anzeige der der Batterie entzogenen Nettoladung ( $q$ );

c) Mitteln, die auf die wiederholten Messungen der Werte für Batteriespannung ( $u$ ), Strom ( $i$ ) und Temperatur ( $\theta$ ) und auf die der Batterie entzogene Nettoladung ( $q$ ) so reagieren, daß sie die der Batterie noch entziehbare Nettoladung ( $q_e$ ) vorhersagen;  
15 gekennzeichnet durch:

d) Mittel zur Bildung einer Anzeige des innerhalb der Batterie fließenden Gasungsstromes ( $i_g$ ), ausgehend von dem Batteriestrom ( $i$ ); und  
20

e) Mittel zur Addition des Gasungsstromes ( $i_g$ ) zu dem Batteriestrom ( $i$ ) vor der Integration desselben, zur Korrektur der Wirkung des Gasungsstromes auf die Anzeige des der Batterie entzogenen Stromes ( $q$ ) und somit auf die der Batterie noch entziehbare Ladung ( $q_e$ ).  
25

Die Erfindung wird nun beispielartig mit Bezug auf die beiliegenden Zeichnungen näher erläutert, in welchen:

Figur 1 ein Ersatzschaltschema einer Blei-Säure-Batterie ist;

30 Figur 2 ein vereinfachtes Ersatzschaltschema einer Blei-Säure-Batterie ist;

Figur 3 das Ersatzschaltbild einer Blei-Säure-Batterie im Überlade-Bereich ist;

Figur 4 die Aufteilung des Batteriemodells in lineare und nichtlineare Komponenten darstellt;  
35

Figur 5 ein Blockschaltbild eines Kalmanfilter-Aufbaus zeigt;

Figur 6 den Verlauf der Strom-Spannungs-Kennlinie der Berührungsspannung zeigt;

5       Figur 7 ein Diagramm ist, in welchem die Kurven für  $i$ ,  $i_1$  und  $i_2$  als Funktion der Ladung  $q$  bei einer neuen Batterie dargestellt sind, wobei  $q=0$  den Beginn der Überladephase darstellt;

10       Figur 8 ein dem in Figur 7 gezeigten ähnliches Diagramm ist, mit Ausnahme der Tatsache, daß die Kurven für eine 4 Jahre alte Batterie gelten, wobei  $q=0$  wiederum den Beginn der Überladephase darstellt;

Figur 9 ein Diagramm ist, welches die Änderung der entziehbaren Ladung  $q_e$  mit dem Entladestrom  $i$  zeigt;

15       Figur 10 ein Diagramm ist, welches die Änderung der entziehbaren Ladung  $q_e$  mit der Temperatur  $\theta$  für eine Anzahl verschiedener Entladeströme  $i$  darstellt;

20       Figur 11 ein Diagramm ist, welches den Ladezustand  $l_z$ , den Batteriestrom  $i$  und die entziehbare Ladung  $q_e$  über der Zeit darstellt, und zwar für eine Stadtfahrt unter Last bei  $-20^\circ\text{C}$ ; und

Figur 12 ein Blockschaltbild des erfindungsgemäßen Batterie-Ladeanzeigers darstellt.

25       Die in eckigen Klammern stehenden Zahlen in der nun folgenden Beschreibung beziehen sich auf die Werke, die in den am Ende der vorliegenden Beschreibung befindlichen Literaturangaben aufgezählt sind.

### 1.       Definitionen und Größen [1, 2]

30       Die kennzeichnenden Größen einer Batterie sind die Nennspannung und die Nennladung, welche von den Batterieherstellern normalerweise als Nennkapazität bzw. Nennleistung bezeichnet werden. In Blei-Säure-Batterien beträgt die Nennspannung  $U_n$  ein Vielfaches der Spannung einer Einzelzelle von 2V.

35       In der vorliegenden Offenbarungsschrift beziehen sich

die Kleinbuchstaben auf Batteriegrößen, die einem Nominalwert zugeordnet sind, so daß z.B.:

$$u = U/U_n$$

5 Dies geschieht aus praktischen Erwägungen, und der Gebrauch der Kleinbuchstaben in den Patentansprüchen sollte keinesfalls als Einschränkung auf den Gebrauch von relativen anstatt absoluten Werten angesehen werden.

10 Die entziehbare Ladung  $q$  ist diejenige Ladung, die entnommen werden kann, bevor die Polspannung der Batterie unter die Entlade-Abschaltspannung abfällt, und ist somit ein Maß für die Speicherkapazität der Batterie [3].

15 Es sei auch angemerkt, daß das Generator-Zähler-Pfeil-System (EVS) angewendet wird, um die elektrischen Größen der Batterie zu umschreiben. Die abgegebene Ladung und der Entladestrom werden positiv gezählt.

## 2. Einschätzung des Batteriezustandes

20 Bei Starterbatterien können die lastfreie Spannung  $u$  und der ohmsche Widerstand  $r$  dazu eingesetzt werden, den Ladezustand zu bestimmen. Die lastfreie Spannung liegt natürlich erst vor, nachdem die Batterie für mehrere Stunden im Ruhezustand verweilt ist. Damit die lastfreie Spannung während des Betriebes der Batterie geschätzt werden kann, wird ein dynamisches mathematisches Batteriemodell verwendet.

25 Zum Zwecke der Schätzung der lastfreien Spannung und anderer Batteriemerkmale, die nicht direkt während des Betriebes gemessen werden können, wird das Kalman-Filter-Verfahren angewendet. Dieses Verfahren wurde zuerst von R.E.Kalman als Verallgemeinerung des Gauss'schen Verfahrens der kleinsten Quadrate entwickelt. Es verwendet ein dynamisches Modell des beobachteten Prozesses und berücksichtigt statistische Eigenschaften, welche die Genauigkeit der an dem System ausgeführten Messungen sowie die Übereinstimmung zwischen Modell und Realität sichern. Dadurch wird eine größere Präzision erzielt als  
35 mit einem Tiefpaßfilter oder einem einfachen Beobachter.



Dieses Verfahren ist natürlich selbst bei einfachen Systemen ziemlich komplex. Die Kosten seiner Anwendung mittels Analog-Techniken wären geradezu abschreckend. Die rasche Entwicklung der Mikrocomputer-Technik jedoch macht es heute möglich, eine Lösung dieses Problems, gestützt auf eine geeignete hohe Programmiersprache, in Single-Board-Computern zu verwirklichen. Dies bedeutet, daß die Einheit in ein Kraftfahrzeug eingebaut werden kann.

## 2.1 Diskretes Batteriemodell

### 2.1.1 Ersatzschaltbild der Blei-Säure-Batterie

Als Grundlage für das Batteriemodell einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung dient das Batteriemodell von Runge [9] und Schleuter [8], wie es in Figur 1 dargestellt ist.

Die Polspannung  $u$  wird bestimmt von der Summe der Einzelspannungen.

$$u = u_r - u_a - u_c \quad (2.1)$$

Die lastfreie Spannung  $u_r$  der Batterie wird gebildet aus der Ursprungsspannung  $u_0$  und der Komponente  $u_c$ , welche die Veränderung der Elektrolytkonzentration in Abhängigkeit von der entzogenen Ladung beschreibt.

$$u_r = u_0 - u_c \quad (2.2)$$

$$\text{Für } u_c \text{ gilt folgende Relation:} \quad (2.3)$$

$$u_c = 1 / c_a \int_0^t i \, dt$$

In diesem Modell kann die lastfreie Spannung durch eine auf die Ursprungsspannung  $u_0$  vorgeladene äquivalente Kapazität  $c_a$  dargestellt werden. Diese relative Arbeitskapazität  $c_a$  beschreibt das Verhältnis von entzogener Ladung  $q$  zu lastfreier Spannung  $u_r$ . Die Größenordnung dieser Kapazität liegt im Megafarad-Bereich. Was die relativen Größen anbelangt, so liegen die Werte im Falle einer Starterbatterie im Bereich von  $c_a = 7$  bis 10.

Der Wert dieser Arbeitskapazität ist nur unwesentlich abhängig von der Temperatur und dem Alter. Da das Verhältnis einmalig beschrieben werden kann und mehr oder weniger unabhängig bleibt von sich ändernden Randbedingungen, wird die Spannung  $u_e$  nicht korrigiert. Um jedoch anschließend die Änderungen der lastfreien Spannung  $u_e$  bestimmen zu können, wird die innere Spannung  $u_i$  der Batterie durch den Filter korrigiert.

Für die Beschreibung der lastfreien Spannung  $u_e$  wird angenommen, daß die Spannung  $u_e$  der voll geladenen Batterie den Wert Null annimmt.  $u_e$  stellt daher die innere Spannung der voll geladenen Zelle im Ruhezustand dar.

Bei den anderen Spannungen kommt es zu Stromstärke-abhängigen Spannungsabfällen.

Die Spannung  $u_a$  beschreibt das Verhalten, das dann vorliegt, wenn die Ladungsträger in die elektrische Doppelschicht Platte/Säure eindringen. Die Strom-Spannungs-Kennlinie ist ähnlich derjenigen einer Diode [8]. Bei schwachen Strömen nimmt der Spannungsabfall zunächst rasch zu, bei starken Strömen jedoch variiert er nur noch unwesentlich. Dieses Verhältnis kann durch die folgende Näherungsformel nach Runge [9] beschrieben werden:

$$u_a = \operatorname{sgn}(i) \cdot u_{a0} \cdot (1 - e^{-|i|/i_{a0}}) + r_{a1} \cdot i \quad (2.4)$$

Diese Gleichung stellt eine gute Näherung der Butler-Volmer-Gleichung dar, welche die Berührungs-Überspannung beschreibt. Der Gebrauch dieser Gleichung ist nur im Bereich der Entladung zulässig, und im Ladebereich bis zur nahezu voll geladenen Batterie. Bei fortschreitender Aufladung löst sich das Bleisulfat nur noch mit geringer Geschwindigkeit auf. In dieser Phase bestimmen die Gasungsreaktion sowie eine Anzahl nichtlinearer Prozesse den Verlauf der Reaktion.

Das nichtlineare Verhalten der Berührungsspannung  $u_a$  kann ungefähr in eine ohmsche und eine nichtlineare Komponente unterteilt werden. Die nichtlineare Komponente ist weitgehend unabhängig von dem Alter und dem Ladezustand. Die lineare Komponente der Gleichung (2.4) wird in dem Filtermodell berück-

sichtigt und näherungsweise korrigiert. Die nichtlineare Komponente ist durch die Exponentialgleichung beschrieben und wird in dem Filter nicht berücksichtigt. Das dynamische Verhalten der Berührungs-Polarisation wird durch die Kapazität  $c_4$  dargestellt. Die Übergangsfunktionen des Auf- und Abbaus dieses Elements sind sehr stark von der Stromstärke abhängig und betragen unter 30 Sekunden. In dem Filter kommt es zu keiner Verarbeitung, da der Meßzyklus von einer Minute größer ist als dieser Zeitraum.

Das Konzentrationselement, das sich aus  $r_1$  und  $c_1$  zusammensetzt, beschreibt die Spannung auf der Grundlage der unterschiedlichen Konzentration der Säure in den Poren der Platten und in dem freien Säurevolumen. Die Säuredichte wird durch Diffusion vergleichmäßigt. Die Zeitkonstante für die Vergleichmäßigung der Säuredichte und die Abnahme der Überspannung beträgt etwa 15 - 60 Minuten und ist in der Richtung der Aufladung und in der Richtung der Entladung unterschiedlich.

Da sich beim Laden verschiedene chemische Prozesse überlagern, bilden sich Spannungsschichten, die den höheren Oxydationszahlen zuzuschreiben sind. Dies verzögert das Abbauverhalten nach dem Laden. Diese Überspannungen sind insbesondere sehr stark temperaturabhängig. Die Stromkonstante steigt auf den nahezu doppelten Wert an, wenn sich die Temperatur von +20 °C auf 0 °C ändert. Der Konzentrationswiderstand  $r_1$  und damit die Höhe der Konzentrationsspannung sind kaum abhängig von dem Ladezustand der Batterie. Bei Beginn der Entladung fällt der Widerstandswert anfangs leicht ab [8], bleibt dann jedoch über den größten Teil des Entladevorgangs konstant, um gegen Ende des Vorganges wieder anzusteigen. Mittelwerte liegen im Bereich von  $r_1 = 0,10$  bis  $0,15$ .

Der Wechselstromwiderstand  $r_2$  enthält die ohmschen Komponenten der Spannung in der Batterie. Diese Größe kann durch Überlagerung des Gleichstromes mit einem Wechselstrom und Messung des Wechselspannungsabfalls bestimmt werden [8]. Es ist auch möglich, die Batterie mit einem abgestuften Strom zu belaste-

sten und den Widerstand aus den zugeordneten Spannungsänderungen zu berechnen.

Nimmt man die Mittelwerte der über einen Zeitraum von einer Minute gemessenen Werte für die Spannung  $u$  und den Strom  $i$ , und läßt man den Kalmanfilter nur jede Minute einen neuen Zustandsvektor abschätzen, kann das Ersatzschaltbild nach Figur 1 vereinfacht werden. Da die Zeitkonstante des Berührungsspannungs-Elements nun kleiner ist als die Meßzeit, kann die Berührungsspannungskapazität  $c_a$  außer Acht gelassen werden, da alle zugehörigen Ab- und Aufbau-Übergangsfunktionen innerhalb dieser Zeitspanne mehr oder weniger abgeschlossen sind. Daraus läßt sich nun ein neues, vereinfachtes Ersatzschaltbild für die Bleibatterie ableiten, wie Figur 2 zeigt.

Der Widerstand  $r_i$  setzt sich zusammen aus den Widerständen  $r_v$  und  $r_{a1}$  aus Gleichung (2.4). Die nichtlineare Komponente des Berührungselementes wird durch die Exponentialfunktion aus der Gleichung (2.4) simuliert.

Um auch den Überladebereich mit zu beschreiben, muß das Batteriemodell um einen die Gasungsreaktion beschreibenden Zweig erweitert werden. Der Zweig der Gasungsreaktion dieses Modells wird durch die Tafel-Gleichung beschrieben.

$$i_g = i_{g0} \cdot e^{(u - u_{g0})/kT} \quad (2.5)$$

Der Gasungsstrom  $i_g$  hängt sehr stark von dem Alter und von der Temperatur ab. Die Temperaturabhängigkeit kann ebenfalls durch eine Exponentialgleichung beschrieben werden.

$$i_{g0}(\theta) = i_{g0}(30^\circ\text{C}) \cdot e^{T \cdot (\theta - 30^\circ\text{C})/k} \quad (2.6)$$

Am Anfang des Überladebereiches ist die Spannungs-kurve durch die Überlagerung von Lade- und Gasungsreaktion gekennzeichnet. Im Falle von hohen Ladezuständen wird die Kurve nur noch von der Gasungsreaktion bestimmt. In dieser Phase beschränkt sich das Ersatzschaltbild auf die in Figur 3 dargestellten Elemente.

Das Konzentrationselement kann außer Acht gelassen werden, da die Ladeströme auf niedrige Werte abgefallen sind und durch das entstehende Kochen eine gute Durchmischung des

Elektrolyts geschaffen wird.

### 2.1.2 Diskretzeit-Darstellung des Batteriemodells

Um einen Kalmanfilter zur Anwendung bringen zu können [14, 16, 17] muß ein Batteriemodell verfügbar sein, welches das Polverhalten zu bestimmten Zeitpunkten im Phasenzeitraum beschreibt [18]. Um einen Kalmanfilter mit linearen Zeitvariablen verwenden zu können, werden die nichtlinearen Komponenten wie im vorangehenden Abschnitt getrennt und als konstantes System beschrieben.

Figur 4 zeigt die beschriebene Situation.

#### 2.1.2.1 Variable Linearmodellkomponente

Der Kalmanfilter korrigiert die folgenden vier Größen in dem Batteriemodell:

Innere Spannung der Batterie:	$u_k$
durch den Konzentrationswiderstand $r_k$ bedingter Strom:	$i_k$
Ohmscher Widerstand der Batterie:	$r_k$
Lineare Komponente des Diffusionswiderstandes:	$r_{d1}$

Die Transformation in ein Diskretzeitmodell wird abgeleitet aus den Übertragungsgleichungen des zeitkontinuierlichen Modells.

Für das Konzentrationselement lautet die Differentialgleichung wie folgt: (2.7)

$$\frac{du_k}{dt} = -\frac{u_k}{r_k \cdot c_k} + \frac{i}{c_k}$$

Mit Hilfe der Laplace-Umformung erhält man die Übertragungsfunktion im Bereich der komplexen Variablen. Durch eine umgekehrte Transformation aus dem Laplace-Bereich in den Bereich der Diskretzeit erhält man eine Impulsreaktion, aus welcher die z-Transformation der Ausgangsspannung abgeleitet wird.

Die Differentialgleichung für das Konzentrations-

element wird aus der Umkehrtransformation aus dem z-Bereich berechnet und lautet wie folgt:

$$u_k(k+1) = u_k(k) \cdot e^{-T/\tau_k} + i(k) \cdot r_k \cdot (1 - e^{-T/\tau_k}) \quad (2.8)$$

mit der Meßzeit T und der Zeitkonstante  $\tau_k$ .

5 In dieser Gleichung ist die Konzentrationsspannung  $u_k$  als eine Zustandsvariable dargestellt. Da der Widerstand  $r_k$  des Konzentrationselements als konstant angenommen wird, wird als Zustandsvektor der Strom  $i_k$  durch den Widerstand  $r_k$  angenommen, anstatt der Spannung  $u_k$ . Demzufolge wird die Differenzgleichung  
10 durch den Widerstand  $r_k$  geteilt, und man erhält eine neue, den Strom  $i_k$  beschreibende Differenzgleichung.

$$i_k(k+1) = i_k(k) \cdot e^{-T/\tau_k} + i(k) \cdot (1 - e^{-T/\tau_k}) \quad (2.9)$$

Die Konzentrationsspannung  $u_k$  erhält man dann aus der anschließenden Multiplikation mit  $r_k$ .

$$u_k(k) = r_k \cdot i_k(k) \quad (2.10)$$

Die Zeitkonstante  $\tau_k$  des Konzentrationselementes variiert gemäß der Temperatur und der Stromrichtung. Im Entladebereich und während der Ruheperiode nach der Entladung ist die Zeitkonstante:

$$\tau_k = 15 \text{ Minuten} \quad (2.11)$$

Während der Aufladung und der anschließenden Ruheperiode verändert sich die Zeitkonstante mit der Temperatur. In diesem Falle wird das folgende Verhältnis angenommen: (2.12)

$$\tau_k = \tau_{k20} \cdot \left(1 + \frac{20^\circ\text{C} - \theta}{20^\circ\text{C}}\right)$$

wobei

$$\tau_{k20} = \tau_k(20^\circ\text{C}) = 60 \text{ Minuten} \quad (2.13)$$

Für die anderen Komponenten gelten die folgenden Gleichungen des kontinuierlichen Zeitsystems:

$$u_o(t) = u_o \quad \text{Innere Spannung} \quad (2.14)$$

$$u_{d1}(t) = r_{d1} \cdot i(t) \quad \text{lineare Komponente der Diffusionsüberspannung} \quad (2.15)$$

$$u_r(t) = r_o \cdot i(t) \quad \text{ohmscher Spannungsabfall} \quad (2.16)$$

Um dieses Modell zu vereinfachen, werden der ohmsche

Widerstand  $r_s$  und der Diffusionswiderstand  $r_{di}$  zum Gesamtwiderstand  $r_t$  vereint.

Die der Summe dieser beiden Widerstände entsprechende Spannung  $u_s$  ist:

$$5 \quad u_s(t) = (r_{di} + r_s) \cdot i(t) = r_t \cdot i(t) \quad (2.17)$$

Die entsprechenden Gleichungen für das Diskretzeitmodell sind:

$$u_o(k) = u_s \quad (2.18)$$

$$u_s(k) = r_t \cdot i(k) \quad (2.19)$$

10 Da der Widerstand  $r_t$  stark von dem Alter, dem Ladezustand und der Temperatur der Batterie abhängt, erscheint es notwendig, diesen Wert ständig den Lade-Randbedingungen entsprechend zu korrigieren. Da der Filter die Werte des Zustandsvektors abschätzen kann, wird der Widerstand  $r_t$  als Zustandsvariable dargestellt. Das gleiche gilt auch für die innere Spannung  $u_o$ . Die Differenzgleichungen für diese Variablen lauten:

$$r_t(k+1) = r_t(k) \quad (2.20)$$

$$u_o(k+1) = u_o(k) \quad (2.21)$$

20 In beiden Fällen wird für alle Zeiten  $kT$  ein konstanter Wert angenommen.

Die Spannung  $u_s(k)$  erhält man durch Multiplikation des Zustandsvektorelementes  $r_t(k)$  mit dem zeitabhängigen Parameter  $i(k)$ .

25 Daraus wird der Zustandsvektor abgeleitet, der die drei Elemente  $u_o$ ,  $i$ , und  $r_t$  enthält.

Für die numerische Beschreibung des Modells wird die Standardkontrollform angewendet, deren Struktur in Figur 5 dargestellt ist.

30

#### 2.1.2.2 Nichtlineare und konstante Modellkomponenten

Dieser Abschnitt beschreibt die nichtlinearen Komponenten des Batteriemodells, die nicht durch den Filter bestimmt werden, sowie diejenigen Elemente, die nicht geschätzt werden.

35

Drei Variablen werden beschrieben:

Nichtlineare Charakteristik der Berührungspolarisation

Maximalwert der inneren Spannung  $u_0$

Gasungsstrom  $i_0$  in der Überladephase

5

#### 2.1.2.2.1 Berührungs-Polarisation

Wie bereits in Abschnitt 2.1.1 erwähnt, wird die Spannung  $u_a$  an der Doppelschicht gemäß Gleichung 2.4 durch die Überlagerung von einer linearen Komponente und einer Exponentialfunktion beschrieben. Die lineare Komponente ist bereits in dem Filtermodell enthalten. Für die nichtlineare Komponente wurde die Gleichung 2.22 formuliert.

10

$$u_a = u_{a0} \cdot (1 - e^{-t/t_{a0}}) \quad (2.22)$$

15

Eine Begrenzungsspannung von  $u_{a0} = 0,025$  und ein Schwellenstrom von  $i_{a0} = 0,15$  wurden für die verwendeten Starterbatterien angenommen. Diese Näherung beschreibt das Berührungsverhalten mit ausreichender Genauigkeit.

20

Da während des in dem Kraftfahrzeug eingesetzten Ladevorganges bei Erreichen des voll geladenen Zustandes eine relativ niedrige Spannungsbegrenzung wirksam ist, fallen die Ladeströme auf Werte ab, die in dem nichtlinearen Bereich der Kurve liegen. Obwohl in dieser Phase eine modifizierte Berührungs-Kennlinie gilt, unterscheiden sich die Werte der beiden Kennlinien für schwache Ladeströme nur sehr wenig.

25

Das verwendete Batteriemodell berücksichtigt nicht den Überladebereich. Da sich die Batterie sowieso in einem guten Ladezustand befindet und die Modellbeschreibung wesentlich komplizierter würde, wird hier nur die Bestimmung des Gasungsstromes  $i_0$  und die Überwachung der Polspannung  $u$  durchgeführt, und es wird von einer eingehenden Beschreibung abgesehen.

30

35

Figur 6 zeigt das Diagramm der verwendeten Strom-Spannungskennlinie. Die punktierte Linie ist das Diagramm der Berührungsspannung gemäß Gleichung 2.4. Die durchgezogene Linie stellt die Exponentialfunktion gemäß Gleichung 2.22 dar.



### 2.1.2.2.2 Spannungsbegrenzung

Aufgrund der Spannungsbegrenzung beim Laden nimmt der Ladestrom stetig ab und wird im Überladebereich schließlich gleich Null. In dieser Phase verschwinden die Spannungsabfälle von  $u_r$ ,  $u_i$  und  $u_o$  in dem Modell. Es liegen dann nur die beiden  
 5 Spannungen vor: Polspannung  $u$  und innere Spannung  $u_o$ .

Besteht zwischen den beiden Spannungen eine Differenz, ist der Kalmanfilter bestrebt, diesen Fehler zu minimieren. Die innere Spannung wird schließlich auf den Wert der  
 10 Lade-Abschalt-Spannung geschätzt. Die innere Spannung  $u_o$  liegt im Bereich von 1,03 bis 1,1, je nach dem Alter der Batterie. Die innere Spannung  $u_o$  übersteigt deshalb in der Realität nicht diesen altersabhängigen Maximalwert. Um den entstehenden Fehler in der Schätzung der inneren Spannung während der Ladephase zu  
 15 vermeiden, wird der Wert für  $u_o$  auf einen Wert  $u_{o,max}$  begrenzt, wenn dieser Maximalwert  $u_{o,max}$  überschritten würde.

Da die Maximalspannung  $u_{o,max}$  mit zunehmendem Alter der Batterie abnimmt, muß der Wert für  $u_{o,max}$  während des Betriebes ständig korrigiert werden. Eine mögliche Lösung besteht darin,  
 20 die geschätzte lastfreie Spannung  $u_r$  zu Beginn einer Ruhephase nach einer Entladung mit einem tatsächlichen Endwert der lastfreien Spannung  $u_{r,e}$  zu vergleichen.

Da es im Betrieb eines Fahrzeuges immer wieder Ruheperioden gibt, ist es möglich, die tatsächliche lastfreie Spannung an den Polen der Batterie zu messen. Ist dieser Wert der  
 25 lastfreien Spannung  $u_{r,e}$  verfügbar, gilt dafür das formale Verhältnis:

$$u_{r,e} = u_{o,new} - q/C_o \quad (2.23)$$

Der Wert der geschätzten lastfreien Spannung  $u_r$  unmittelbar vor der Stabilisierung wird unter Einsatz derselben Formel berechnet:

$$u_r = u_{o,old} - q/C_o \quad (2.24)$$

Berechnet man die Differenz zwischen den beiden Spannungen und löst die Gleichung nach  $u_{o,new}$  auf, erhält man einen  
 35 neuen verbesserten Wert für  $u_{o,max}$ .

$$U_{\text{new}} = U_{\text{old}} + (U_{\text{re}} - U_{\text{r}}) \quad (2.25)$$

Diese neue innere Spannung  $U_{\text{new}}$  wird zur Korrektur von  $U_{\text{old}}$  eingesetzt. Da nach der Korrektur die Differenz zwischen geschätzter und tatsächlicher lastfreier Spannung verringert ist, verkleinert sich der Fehler der Modell-Schätzung.

#### 2.1.2.2.3 Schätzung des Gasungsstromes

Das vorliegende Modell einer Bleibatterie beschreibt mit hinreichender Genauigkeit das Verhalten der Batterie, sowohl beim Entlade- als auch beim Ladevorgang, bis zum Überlade-

punkt. In der Überladephase wird eine Schätzung des Gasungsstromes  $i_g$  durchgeführt. Die Höhe des Gasungsstromes  $i_g$  hängt weitgehend von der Temperatur und dem Alter ab. Seine Höhe stellt ein Maß für die Selbstentladung der Batterie und den Wasserverbrauch während dem Kochen der Batterie dar. Da die Überspannung für die Produktion von Wasserstoff mit dem Alter abnimmt, fallen die Werte irgendwann unter die gewöhnliche Lade-Abschalt-Spannung in einem Kraftfahrzeug ab. Kann festgestellt werden, daß der Gasungsstrom  $i_g$  steigt, kann dieser Effekt durch eine entsprechende Absenkung der Lade-Abschalt-Spannung wieder reduziert werden.

Aufgrund der obenstehenden Aspekte ist es notwendig, den Gasungsstrom  $i_g$  der Batterie zu bestimmen, besonders deshalb, weil die vorhandene Messung des zugeführten Ladestroms in der Überladephase unrichtige Werte ergibt, da der für die Gasbildung (das Kochen) erforderliche Anteil des Ladestromes nicht zur Erhöhung der Ladung beiträgt.

Wie in Abschnitt 2.1.2 erläutert, wird das Verhalten während des Kochens durch die Tafel-Gleichung beschrieben. In dieser Gleichung muß der Wert von  $i_{g0}$  bekannt sein, damit der Gasungsstrom  $i_g$  berechnet werden kann. Da allerdings der Wert von  $i_{g0}$  von dem Alter abhängt, ist versucht worden,  $i_g$  zu schätzen, so daß durch Überwachung von  $i_g$  und der konstanten Spannung  $U_{g0}$ , unter Berücksichtigung der Temperatur, der Wert für

$i_{g0}$  berechnet werden konnte.

Nimmt man eine neue Batterie und beobachtet man deren Verhalten im Überladebereich, während sie mit einer konstanten Spannung geladen wird, bis ein minimaler Lade-Endstrom erreicht ist, kann dieser Endwert des Stromes als Gasungsstrom  $i_g$  übernommen werden, da in dieser Phase der gesamte in der Batterie fließende Strom für die Gasungsreaktion verbraucht wird. Der Wert für  $i_{g0}$  kann nun mit Hilfe der Formeln 2.5 und 2.6 berechnet werden.

Die beschriebene Situation veranschaulicht Figur 7. Der Ladestrom  $i$  ist gegenüber der tatsächlich gelieferten Ladung abgetragen. Der Ladestrom beinhaltet den Strom  $i_l$  für die Ladereaktion und den Strom  $i_g$  für die Gasungsreaktion.

$$i = i_l + i_g \quad (2.26)$$

Da die Ladespannung in dieser Phase konstant bleibt, ergibt sich auch ein konstanter Wert für den Gasungsstrom  $i_g$ , wie aus der Figur hervorgeht. Zieht man den konstanten Gasungsstrom  $i_g$  vom Gesamtstrom  $i$  ab, erhält man den Wert für  $i_l$ . In der Figur ist die Kurve für  $i_l$  als parallel zur Kurve des Stromes  $i$  verschoben dargestellt. In guter Näherung kann die für den Strom  $i_l$  erstellte Kurve als altersunabhängig angesehen werden. Die als Funktion der Ladung  $q$  aufgezeichnete Kurve des Stromes  $i_l$  einer neuen Batterie ist mit Hilfe mehrerer Bezugspunkte in dem Computer gespeichert, und die Zwischenwerte werden mittels linearer Interpolation näherungsweise ermittelt.

Erreicht eine Batterie eines beliebigen Alters den Überladebereich, wird der altersunabhängige Strom  $i_l$  der Ladereaktion von dem gemessenen Strom  $i$  abgezogen, und man erhält den Gasungsstrom  $i_g$ , davon ausgehend kann dann  $i_{g0}$  berechnet werden. Der Ladestrom  $i_l$  wird zur Berechnung der Ladung  $q$  herangezogen. Wie Figur 8 zeigt, bietet dieses Verfahren eine Angabe des Gasungsstromes  $i_g$ . Die in der Figur gezeigte Kurve für  $i_g$  wurde für eine alte Batterie mit einem hohen Gasungsstrom geschätzt, mit Hilfe einer gespeicherten Kennlinie für den Ladestrom  $i_l$ , der für eine neue Batterie ermittelt worden war. Da die Schät-

zung von  $i_0$ , ausgehend von der gespeicherten Kurve für  $i_0$  zu Beginn der Überladephase eine sehr starke Abweichung zeigen kann, werden die gemessenen Werte für  $i$  anfänglich nicht in hohem Maße in die Schätzung mit einbezogen. Der Anfangswert für den Gasungsstrom liegt daher bei dem Wert  $i_0$ , wie er für eine neue Batterie angenommen wird, und der dem tatsächlichen Wert des Gasungsstromes  $i_0$  bei fortschreitendem Überladen näher kommt.

### 3. Bestimmung des Ladezustandes

In diesem Abschnitt soll ein Verfahren zur Bestimmung des Ladezustandes erläutert werden, bei welchem die inneren Größen der Batterie über den Kalmanfilter geschätzt werden.

#### 3.1 Einflüsse auf die entziehbare Ladung

Die zu einem beliebigen Zeitpunkt aus einer Blei-Ak-kumulatorbatterie entziehbare Ladung hängt von einer Reihe von Einflüssen ab. Die Haupteinflüsse sind die Abhängigkeit vom Entladestrom, von der Temperatur und von dem Alter der Batterie. Die Standzeit seit dem letzten Ladevorgang sowie die Art des letzten Ladevorganges und der letzten Entladung haben jedoch ebenfalls einen Einfluß auf die entziehbare Ladung  $q$ .

##### 3.1.1 Einfluß des Entladestromes

Die niedrige Diffusionsgeschwindigkeit des Elektrolyts ist der Grund für den Abfall der entziehbaren Ladung  $q$  mit zunehmendem Entladestrom  $i$ .

Figur 9 zeigt die Kurve der entziehbaren Ladung  $q$ , abgetragen über dem Entladestrom  $i$ . Die entziehbare Ladung nimmt mit zunehmender Stromstärke deutlich ab und kann bei Anlaßvorgängen auf Werte unter 40% der Nominalladung  $Q_0$  einer neuen Batterie fallen. Bei einer 20stündigen Entladung mit  $i = 0,05$  ist die Nominalladung definitionsgemäß entzogen. Diese Zahlen gelten für eine Elektrolyttemperatur von 20 °C.

Wird nach einer Entladung mit starkem Entladestrom

die Entlade-Abschaltspannung erreicht, ist die Batterie noch lange nicht völlig entladen. Die noch verbleibende Restladung kann nämlich nach einem relativ langen lastfreien Zeitraum durch eine Entladung bei niedriger Stromstärke entzogen werden.

5 Diese Erscheinung entsteht aus der Tatsache, daß, wenn Strom fließen soll, Ionen durch den Elektrolyten wandern müssen. Die Ionen können jedoch nur mit einer bestimmten Geschwindigkeit diffundieren, die von der Säuredichte abhängt. Bei starken Strömen stehen schließlich die Ionen nicht mehr in  
10 ausreichender Anzahl zur Verfügung. Der dann erzeugte Entladestrom ergibt sich aus der in dem besonderen Fall noch vorliegenden Diffusionsgeschwindigkeit.

Beim Einsatz einer Starterbatterie im normalen Stadtverkehr wurden nur selten Spitzenwerte des Entladestromes über  
15  $i = 0,2$  gemessen. Selbst unter extremen Bedingungen stiegen die Maximalwerte nie über  $i = 0,5$ . Der Mittelwert der Entladung liegt typischerweise bei  $i \leq 0,2$ , was einer entziehbaren Ladung von  $q_e = 0,85$  entspricht. Die entziehbare schwankt daher höchstens zwischen  $0,75 \leq q_e \leq 1,0$  bei einer neuen Batterie. Allein  
20 der Startvorgang mit Strömen von  $i = 5,0$  stellt eine andere Betriebsbedingung dar. Da dieser Vorgang normalerweise selten länger als 10 Sekunden dauert, ist die entzogene Ladung ( $\leq 0,002$ ) vernachlässigbar klein.

### 25 3.1.2 Einfluß der Temperatur

Die Temperatur des Elektrolyten hat einen erheblichen Einfluß auf die entziehbare Ladung  $q_e$ . Bei fallender Temperatur steigt die Viskosität der Säure, die Diffusionsgeschwindigkeit sinkt und der ohmsche Widerstand des Elektrolyten steigt. Figur  
30 10 zeigt den Einfluß der Temperatur auf die entziehbare Ladung  $q_e$  für verschiedene Entladeströme [8]. Über dem Gefrierpunkt kommt es zu einem Anstieg von ungefähr 0,6 %/K, und unter dem Gefrierpunkt zu einem Anstieg von ungefähr 1,0 %/K. Bezieht man die entziehbare Ladung  $q_e(\theta, i)$  auf die entziehbare Ladung  
35  $q_e(30^\circ\text{C}, i)$ , ergibt sich daraus noch in guter Näherung nur eine

Kurve [4]. Die Temperaturabhängigkeit ist daher weitgehend von der Stromabhängigkeit abgekoppelt.

### 3.1.3 Einfluß der Alterung

5           ... Blei-Akkumulatorbatterien sind wie jedes andere Maschinenteil einer natürlichen Alterung unterworfen, die durch unsachgemäße Behandlung beschleunigt werden kann. Der Haupteinfluß der Alterung ist die Reduzierung der entziehbaren Ladung aufgrund von Stoff-Verlust, Korrosion der Gitterplatten, 10   bleibender Sulfatbildung und Verbleiung [5, 6, 7, 10, 11].

Verstärkter Stoffverlust entsteht in erster Linie aufgrund hoher Anlasserströme, die eine Bewegung der Platten bewirken. Auch starke Erschütterungen sind oft der Grund eines plötzlichen Ausfalls der Batterie. Unterhalb der Platten befindet sich häufig kein Schlammammelraum zur Aufnahme abfallender 15   Teilchen, so daß sich das Material gewöhnlich im unteren Bereich der Platte ansammelt. Da man die Platten zwecks hoher Energieausbeute sehr dicht aneinander legt, werden die Trennplatten schließlich sehr dünn und können durch abgelöste Teilchen zerstört werden, wodurch es zu örtlichen Kurzschlüssen in 20   der Batterie kommen kann.

Zur Korrosion der Gitterplatten kommt es in erster Linie an der positiven Elektrode, infolge der aggressiven Schwefelsäure. Intensive Korrosion tritt insbesondere im voll 25   geladenen Zustand auf, bei hohen Temperaturen und bei zu hohen Lade-Abschaltspannungen. Katalysatoren, einschließlich dem Antimon Sb der Gitterlegierung, begünstigen ebenfalls den Korrosionsprozeß. Das Ergebnis der Korrosion ist ein Volumenanstieg der positiven Platte und eine Verringerung des elektrisch leitenden Querschnitts. Nach einer gewissen Zeit ergibt diese Ausdehnung ein Abblättern der Bleipaste und kann zu Kurzschlüssen 30   führen. Bleibende Sulfatbildung und Verbleiung verringern die Oberfläche der Platten, was einen Verlust an Kapazität bewirkt. Dieser Prozeß wird beschleunigt, wenn teilweise oder ganz entladene Zellen nicht sofort nachgeladen werden, oder durch un- 35

vollständiges Laden und durch hohe Säurekonzentrationen.

Alle diese Veränderungen beeinflussen die entziehbare Ladung  $q_e$ , welche durch Messungen der Spannung, des Stroms und der Temperatur leider nur teilweise im voraus bestimmt werden kann.

### 3.2 Bestimmung der entziehbaren Ladung

Im vorangehenden Abschnitt wurde gezeigt, daß die entziehbare Ladung  $q_e$  im wesentlichen eine Funktion des Entladestroms  $i$ , der Temperatur  $\theta$  und des Alters  $A$  ist.

$$q_e = f(i, \theta, A)$$

Im typischen Fall übersteigt der Strom  $i_{\dots}$  nicht 0,5, und die entziehbare Ladung liegt nicht unter 0,75. Die Kurve wird näherungsweise erstellt durch stückweise Linearisation, gestützt auf vier Bezugspunkte. Die verzögerte Änderung der entziehbaren Ladung  $q_e$  bei abnehmendem Entladestrom  $i$  erhält man durch Verzögerung der Sammlung des Stroms mittels eines Tiefpaßfilters mit einer Zeitkonstante von einer Stunde.

Ist der altersabhängige Wert für  $q_{e0}(A)$  verfügbar, wird der noch vorhandene Fehler auf die Abweichungen der näherungsweisen Einschätzung des Stromes und der Temperatur gegenüber dem tatsächlichen Verhalten begrenzt. Der verbleibende Restfehler ist kleiner als 10 %.

## 4. Funktionsbeschreibung der Einschätzung des Batterie- zustandes

Mit Hilfe des Block-Schaltbildes der Figur 12 soll nun im einzelnen die Funktion des Batterie-Ladezustandsanzeigers nach der vorliegenden Erfindung beschrieben werden.

Die erforderlichen Eingabegrößen sind der Batteriestrom  $i$ , die Batteriespannung  $u$  und die Elektrolyttemperatur  $\theta$ , die jeweils an den Leitungen 17, 18 und 19 vorliegen. Der Strom  $i$  wird in den Batteriestrom-Integrationsmitteln 22 zur Bestimmung der Ladung  $q$  eingesetzt, sowie im Kalmanfilter 21, zur Schätzung des Batteriezustandes und zur Schätzung der diesen

Zustand anzeigenden Batterieparameter. Er dient als Eingabe-  
größe für Block 20 zum Zwecke der Bestimmung der nichtlinearen  
Komponenten der Berührungsspannung  $u_0$ . In Block 23 wird, aus-  
gehend von dem Batteriestrom  $i$  und den Größen  $u_0$ ,  $r_0$ ,  $u$  und  $\theta$ ,  
5 die entziehbare Ladung  $q_0$  berechnet.

Um die Selbstentladung und das Gasen mit zu berücksichtigen, wird der Strom  $i$  im Addierer 24 zu dem spannungsabhängigen Wert des Gasungsstroms  $i_g$  addiert und auf diese Weise  
in die Rechnung mit einbezogen. Der Wert der entzogenen Ladung  
10  $q$  wird in Block 25 durch die temperaturabhängige äquivalente Kapazität  $c$  geteilt und ergibt so den Spannungsabfall  $u_c$  am Kondensator. Die Summe aus  $u_c$  und  $u_0$  wird durch den Addierer 26 erzeugt und durch den Addierer 27 von der Batteriespannung  $u$  abgezogen. Diese Differenzspannung dient als Vergleichswert für  
15 den Kalmanfilter 21. Der Filter liefert die geschätzten Werte der inneren Batteriegrößen  $u_0$ ,  $i_0$  und  $r_0$ . Der Ladestrom  $i_0$  wird in Block 22 nur bei positiven Werte von  $q$  mit einbezogen. Erreicht die Ladung  $q$  den Wert Null, stoppt sie über die Leitung 18 alle weiteren Ladungsberechnungen und löst über die Leitung  
20 30 die Berechnung der Überladung  $q_0$  in den Überladestrom-Integrationsmitteln 29 aus. Die Überladung  $q_0$  wird Block 31 zugeführt, wo sie dazu eingesetzt wird, einen Schätzwert  $i'$ , des Ladestromes zu bestimmen, und zwar ausgehend von einer gespeicherten Kennlinie des Verhältnisses dieser beiden Größen  
25 zueinander.

Der geschätzte Wert für  $i'$  wird im Addierer 32 mit dem gemessenen Wert  $i$  kombiniert, um eine Schätzung des Gasungsstromes  $i_g$  zu erstellen. Aus dem Wert  $i_g$  wird in Block 33 der Mittelwert  $i_{g0}$  berechnet und eine Angabe zu dem Gasungsstrom  
30  $i_g$  erzeugt, die die Temperatur und die Spannung berücksichtigt.

Der Ladezustand  $lz$  wird in Block 34 berechnet, unter Einbeziehung der entziehbaren Ladung  $q_0$  und der entzogenen Ladung  $q$ . Die innere Spannung  $u_0$ , der Widerstand  $r_0$ , die entzogene Ladung  $q$ , die entziehbare Ladung  $q_0$ , der Ladezustand  $lz$  und der  
35 Gasungsstrom  $i_g$  werden dann angezeigt.



## 5. Zusammenfassung

Die bevorzugte Ausführungsform der vorliegenden Erfindung liefert einen Batterie-Ladezustandsanzeiger, welcher Mittel zur Bestimmung der inneren Größen der Batterie aufweist.

Das Batteriemodell basiert auf den Elementen eines Ersatzschaltbildes mit Parametern, die jeweils nur für eine bestimmte Betriebssituation festgelegt sind. Die Parameter werden ständig überwacht und geändert, um andere Betriebsbedingungen zu berücksichtigen.

Zur Überwachung und Änderung der Parameter wird ein Kalmanfilter zum Einsatz gebracht. Da dieser eine lineare Schätzfunktion darstellt, die Elemente jedoch teilweise nicht-lineares Verhalten zeigen, wird das Batteriemodell unterteilt. Die nichtlinearen und die konstanten Elemente werden in einem konstanten Teil des Modells miteinander kombiniert, und nur die linear veränderlichen Elemente werden in das Filtermodell einbezogen.

Dank dieser Schätzung des Zustandes kann sich das System an eine besondere Batterie und an die zu dem gegebenen Zeitpunkt geltende Betriebssituation anpassen.

## 6. Literaturangaben

[1] DIN 40729, "Galvanic secondary cells (storage batteries). Definitions" (Galvanische Sekundärzellen (Akkumulatorbatterien). Begriffserklärungen), Beuth-Verlag, Berlin, Oktober 1975.

[2] DIN 72311, "Lead batteries. Storage batteries for starting, lighting and ignition. Testing" (Bleibatterien. Akkumulatorbatterien für Anlasser, Beleuchtung und Zündung. Prüfung), Beuth-Verlag, Berlin, Mai 1977.

[3] DIN 45539, "Lead batteries, vehicle drive cells and batteries" (Bleibatterien, Antriebszellen für Fahrzeuge und Batterien), Teil 3, "Testing regulations (electrical and physical)" (Prüfvorschriften (elektrische und physikalische)), Beuth-Verlag, Berlin 1978.

- [4] G. Wille, "Contribution to the determination of the energy consumption and residual range of electric road vehicles" (Beitrag zur Bestimmung des Energieverbrauchs und des Restaktionsradius von elektrischen Straßenfahrzeugen), Dissertation RWTH Aachen, 1983.
- [5] G. Huster, "Life statistics of storage batteries" (Statistiken zur Lebensdauer von Akkumulatorbatterien), VARTA, Aktuelle Batterieforschung, 1966.
- [6] E. Voss, G. Huster, "Reliability of lead batteries" (Zuverlässigkeit von Bleibatterien), Chemie-Ingenieur-Technik, 38, 1966, pp. 623 bis 626.
- [7] T. Geber, "Investigations of the life of tube-plate batteries for stationary operation" (Untersuchungen zur Lebensdauer von Batterien mit Röhrenplatten für stationären Betrieb), Technische Mitteilungen PTT, 54, (6), 6/1976, pp. 190 bis 205.
- [8] W. Schleuter, "Description of the electrical behaviour of lead, nickel-cadmium and nickel-iron batteries" (Beschreibung des elektrischen Verhaltens von Blei-, Nickel-Cadmium- und Nickel-Eisen-Batterien), Dissertation RWTH Aachen, 1982.
- [9] W. Runge, "Calculation and interpretation of the steady-state and dynamic behaviour of lead batteries" (Berechnung und Interpretation des statischen und dynamischen Verhaltens von Bleibatterien), Dissertation RWTH Aachen, 1974.
- [10] E. Voss, G. Huster, "The effect of depth of discharge on the cycle life of positive lead-acid plates" (Die Wirkung der Tiefe der Entladung auf das Taktleben der positiven Bleisäure-Platten), 29. AGARD-Versammlung, Lüttich 1967, pp. 57 bis 72.
- [11] F. Kretzschmar, "The diseases of lead batteries" (Die Krankheiten von Bleibatterien), R. Oldenbourg-Verlag, München, Berlin, 1922.
- [14] K.W. Schrick, "Applications of Kalman filtering" (Anwendungsfälle des Kalmanfilters), Oldenbourg-Verlag, 1977.
- [15] H.D. Luke, "Digital signal processing" (Digitale

Signalverarbeitung), Vorlesung, RWTH Aachen, SS 1980.

[16] A. Weimann, "Discrete Kalman filters and their calculation process" (Diskrete Kalmanfilter und ihr Rechenverfahren), ELIN-Zeitschrift N° 3/4, 1985, pp. 83 und 85.

5 [17] J. Melsa, D. Cohn, "Decision and estimation theory" (Theorie der Entscheidung und der Schätzung), McGraw-Hill Kogakusha, Tokyo, 1978.

[18] Arild Lacroix, "Digital filters: Introduction to discrete-time signals and systems" (Digitalfilter: Einführung in Diskretzeit-Signale und -Systeme), R. Oldenbourg, München, Wien, 10 1980.

PATENTANSPRÜCHE

5

1. Batterie-Ladezustands-Anzeiger für eine Kraftfahrzeug-Starterbatterie, mit:

5

a) Mitteln zur periodischen Messung der Ausgangsspannung ( $u$ ), des der Batterie entzogenen oder zugeführten Stromes ( $i$ ), und der Temperatur ( $\theta$ ) der Batterie;

10

b) Mitteln (22) zur Batteriestrom-Integration, zur Integration des Batteriestromes ( $i$ ) in bezug auf die Zeit, zwecks Erstellung einer Anzeige der der Batterie entzogenen Nettoladung ( $q$ );

10

c) Mitteln (21, 23), die auf die wiederholten Messungen der Werte für Batteriespannung ( $u$ ), Strom ( $i$ ) und Temperatur ( $\theta$ ) und auf die der Batterie entzogene Nettoladung ( $q$ ) so reagieren, daß sie die der Batterie noch entziehbare Nettoladung ( $q_0$ ) vorhersagen;

15

gekennzeichnet durch:

d) Mittel (33) zur Bildung einer Anzeige des innerhalb der Batterie fließenden Gasungsstromes ( $i_g$ ), ausgehend von dem Batteriestrom ( $i$ ); und

20

e) Mittel (24) zur Addierung des Gasungsstromes ( $i_g$ ) zu dem Batteriestrom ( $i$ ) vor der Integration desselben, zur Korrektur der Wirkung des Gasungsstromes auf die Anzeige des der Batterie entzogenen Stromes ( $q$ ) und somit auf die der Batterie noch entziehbare Ladung ( $q_0$ ).

25

2. Batterie-Ladezustands-Anzeiger nach Anspruch 1, gekennzeichnet durch:

a) Mittel zur Außerbetriebsetzung der Batteriestrom-Integrationsmittel (22) sobald die entzogene Ladung ( $q$ ) auf Null abfällt; und

30

b) Überladestrom-Integrationsmittel (29), die nur

dann in Betrieb gesetzt werden, wenn die entzogene Ladung gleich Null ist, zur Bildung einer Anzeige des der Batterie zugeführten Überladestroms ( $q_u$ ), während diese sich in einem Zustand voller Ladung befindet.

5

3. Batterie-Ladezustands-Anzeiger nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Mittel (33) zur Anzeige des Gasungsstroms auf die Anzeigewerte für Spannung ( $u$ ) und Temperatur ( $\theta$ ) so reagieren, daß sie  $i_g$  nach folgender Formel berechnen:

10

$$i_g = i_{g0} \cdot (u - u_{g0}) / k\theta$$

wobei:  $u_{g0}$  die Batteriespannung bei offenem Stromkreis ist,  
 $k$  eine Konstante ist,  
 $i_{g0}$  der Gasungsstrom im Ruhezustand ist.

15

4. Batterie-Ladezustands-Anzeiger nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Mittel (33) zur Anzeige des Gasungsstroms eine Schätzung des Gasungsstroms im Ruhezustand ( $i_{g0}$ ) liefern, ausgehend von der Differenz zwischen einem geschätzten Wert ( $i_g$ ) und dem während der Ladephase gemessenen Strom ( $i$ ).

20

5. Batterie-Ladezustands-Anzeiger nach einem beliebigen der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß bei den Mittel (21, 23) zur Vorhersage der entziehbaren Ladung ein zweiteiliges mathematisches Modell zum Einsatz kommt, wobei der erste Teil ein lineares Modell ist, welches interne Batteriemengen vorhersagt, die sich linear mit meßbaren Batteriewerten ändern, und wobei der zweite Teil interne Batteriemengen vorhersagt, die in einer nicht-linearen Beziehung zu meßbaren Werten stehen.

25

30

6. Batterie-Ladezustands-Anzeiger nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß der erste Teil des mathematischen Modells ein rekursiver Digitalfilter (21) ist.

35

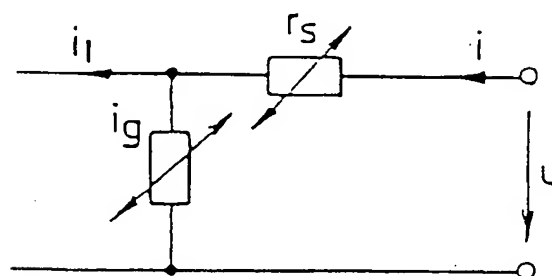
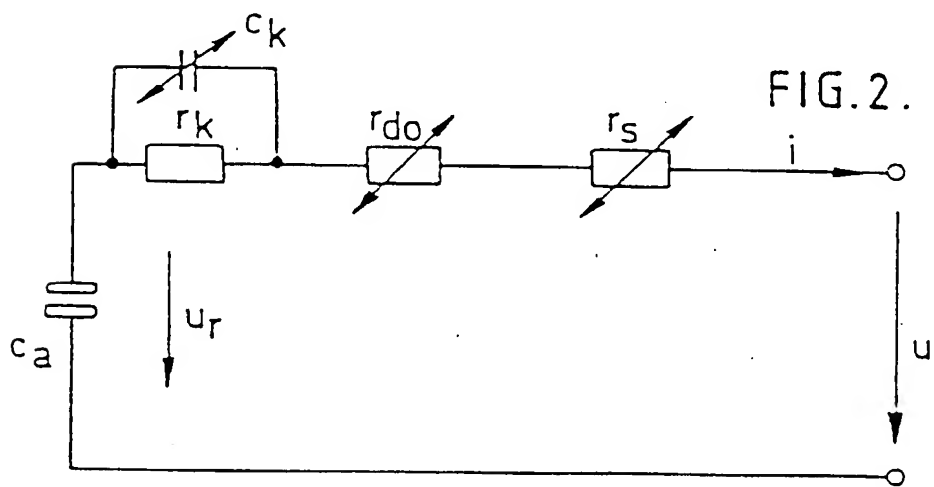
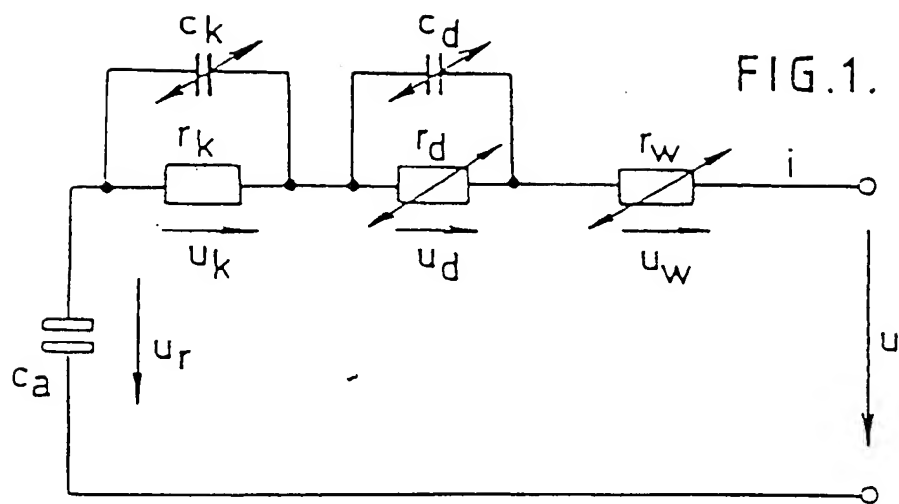
7. Batterie-Ladezustands-Anzeiger nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß der Digitalfilter (21) ein Kalmanfilter ist.

5           8. Batterie-Ladezustands-Anzeiger nach Anspruch 6 oder Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß die vorhergesagte Restspannung ( $u_r$ ) mit einem gemessenen Wert der tatsächlichen Restspannung verglichen wird, wenn die Batterie für eine bestimmte Zeit im Ruhezustand war, und daß die Parameter des mathematischen Modells zur Reduzierung der Differenz zwischen  
10           vorhergesagten und tatsächlichen Werten korrigiert werden.

          9. Batterie-Ladezustands-Anzeiger nach einem beliebigen der vorangehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch Mittel  
15           zur Erzeugung eines Ladungssignals ( $l_r$ ), das abgeleitet ist aus der entziehbaren Ladung ( $q_r$ ) und der entzogenen Ladung ( $q$ ), und zwar nach folgender Beziehung:

$$l_r = (q_r - q)/q_r.$$

1/6



2/6

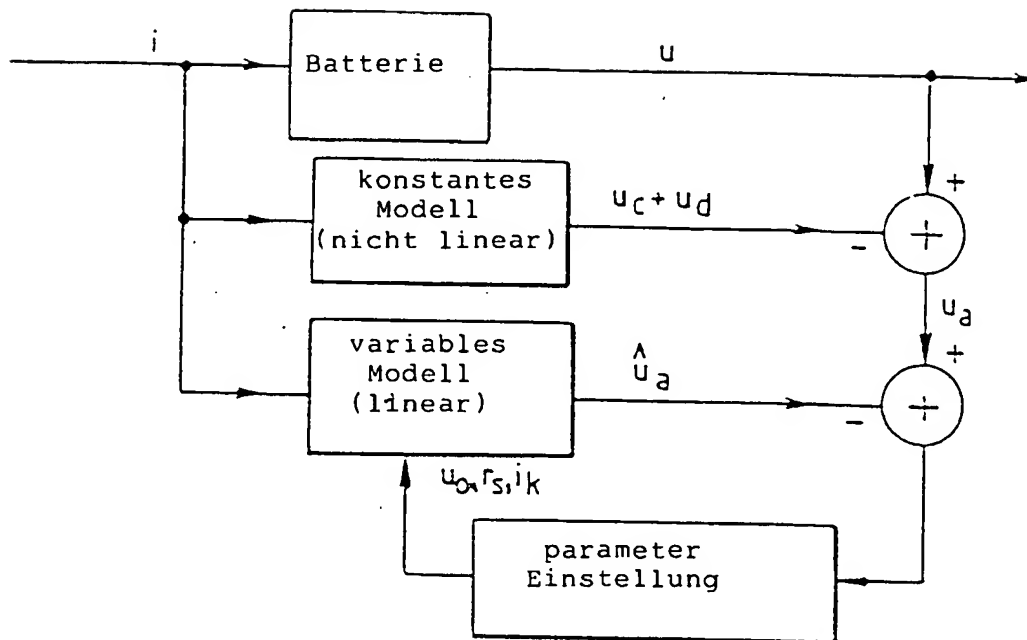


FIG.4.

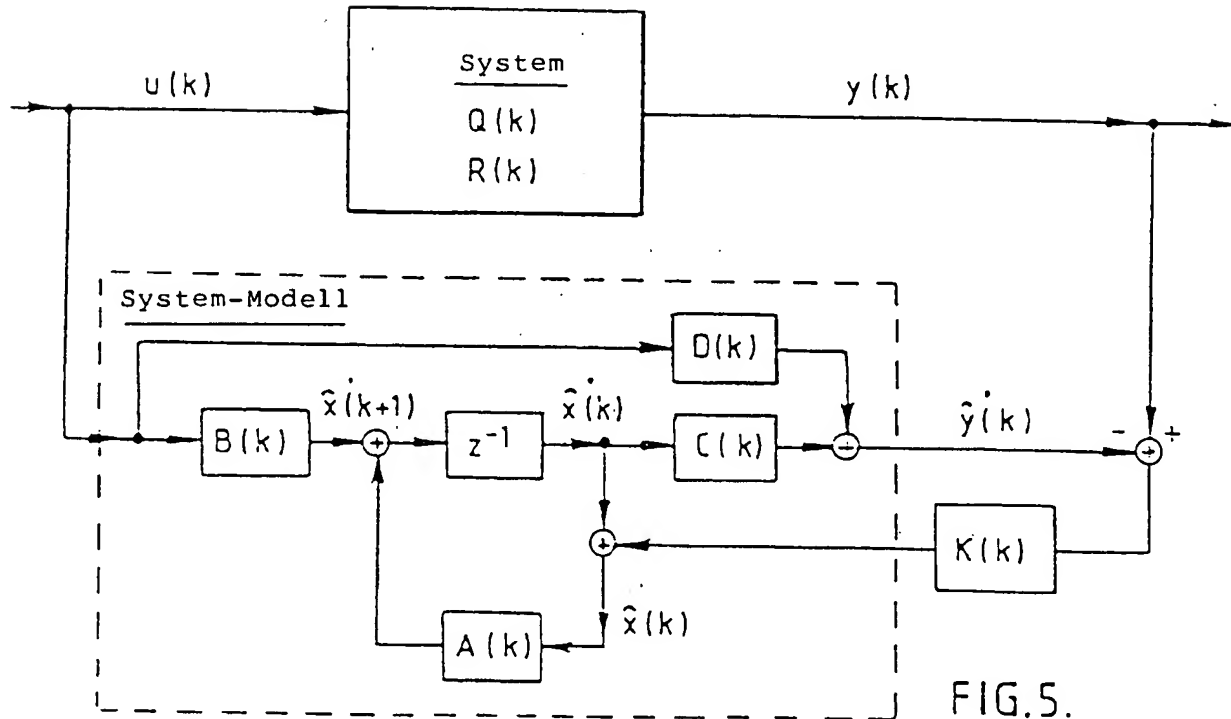
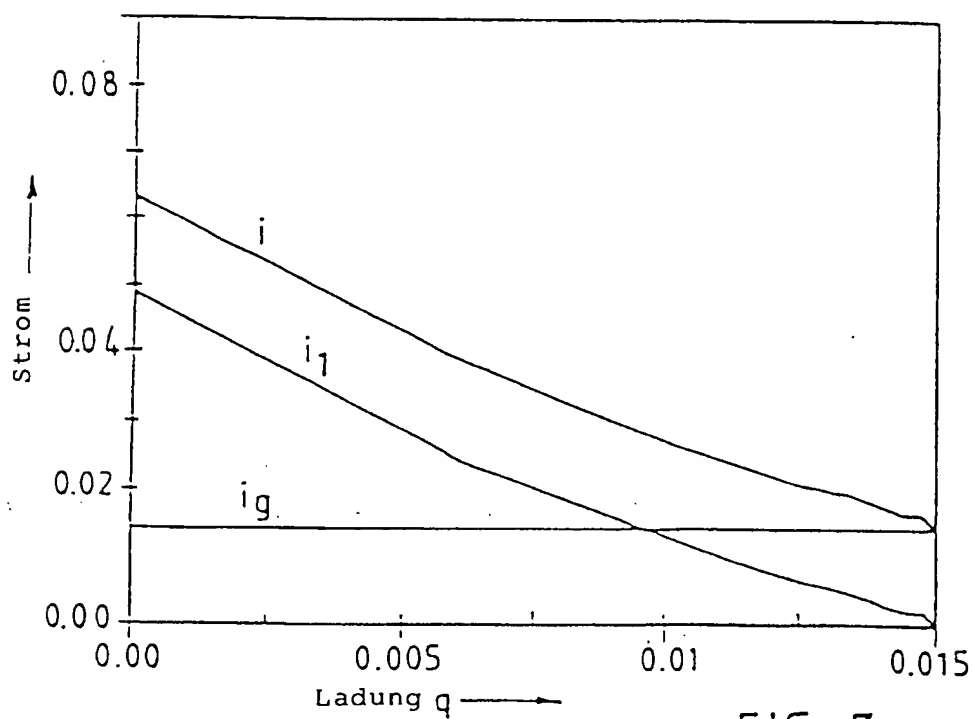
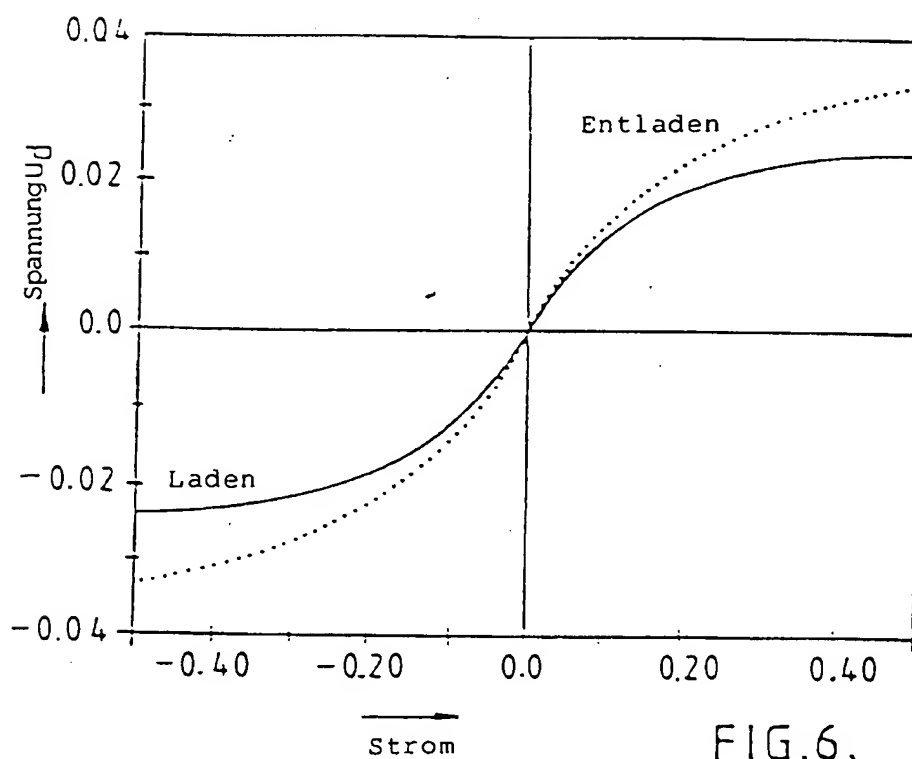


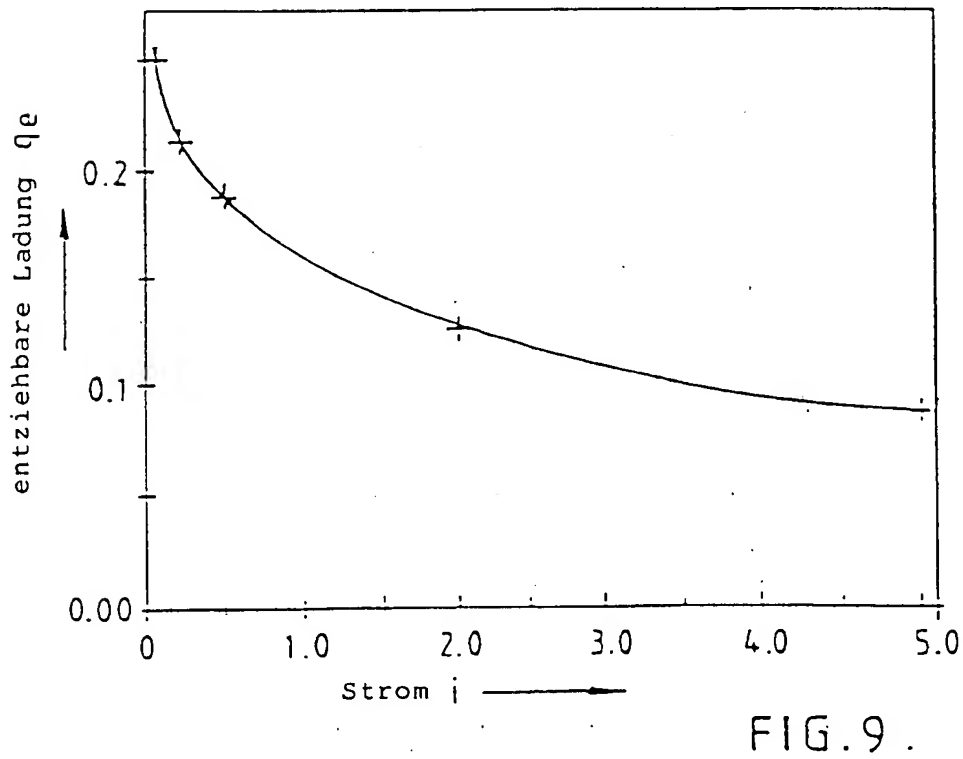
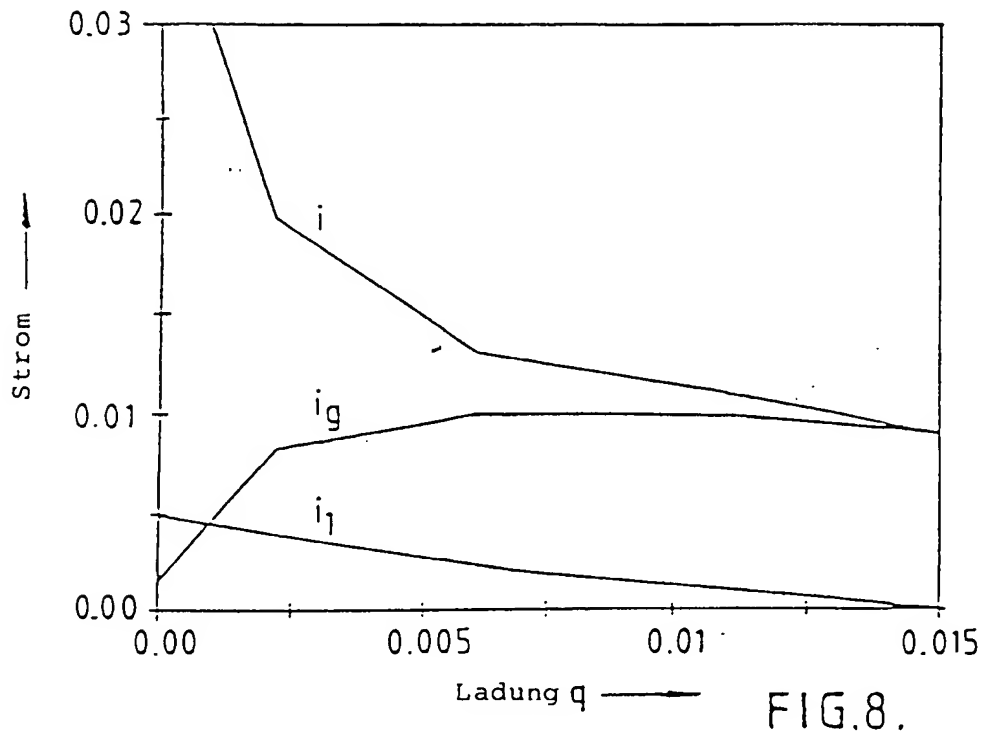
FIG.5.



3/5



4/6



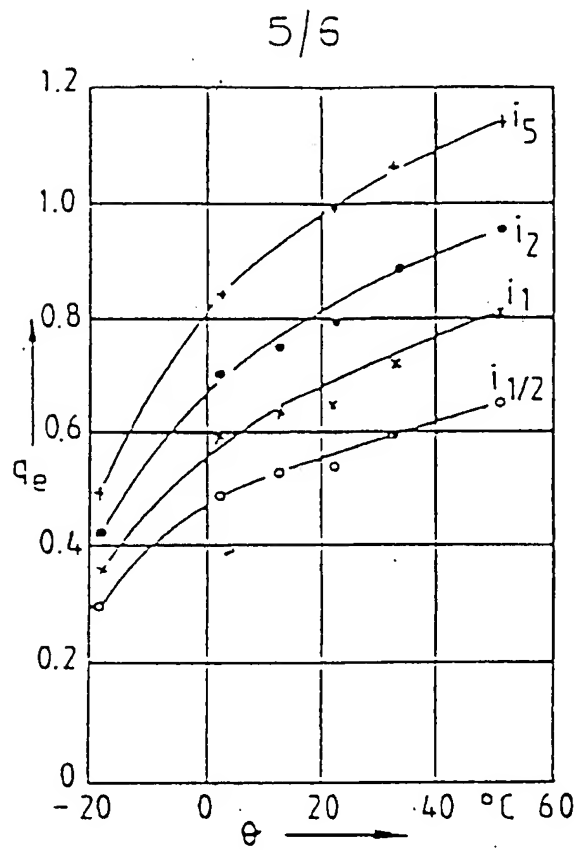


FIG. 10.

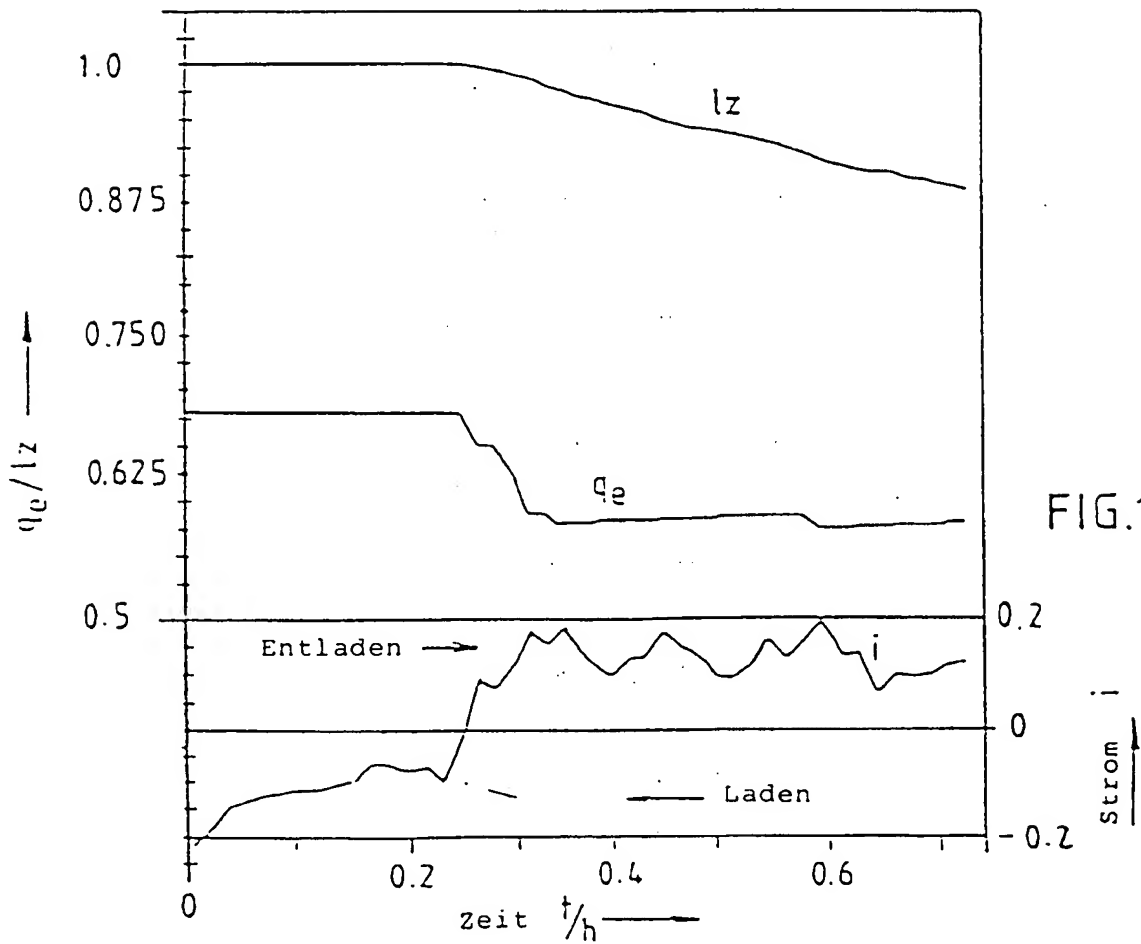


FIG. 11.

6/6

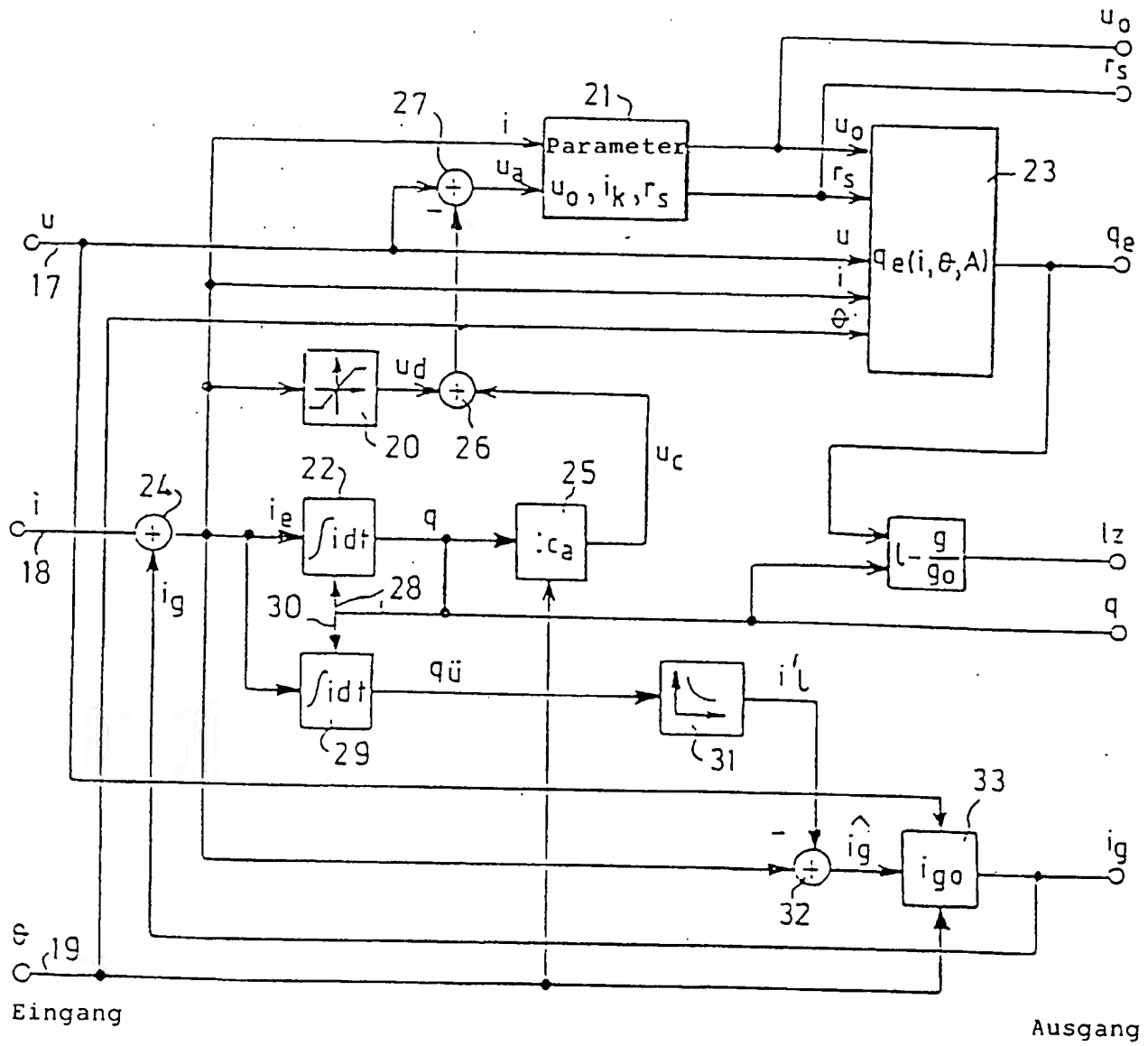


FIG.12.